
* 研究简报 *

(18) 88-92

一种用于超导测量的微弱信号放大器

涂启新 金泽渊
(湖南师范大学物理学系,长沙,410081)

TN 722.72

摘 要 本文介绍了一种用于超导临界温度 T_c 测量的双端输入微弱信号放大器,分析了它的设计特点、电路原理及技术措施。

关键词 高分辨率;测量误差;A/D 转换;数字显示

分类号 O411.3

放大器,
超导体, T_c .

A Weak Signal Amplifier Used to Measure Superconductor

Tu Gesin Jin Zeyuan

(Department of Physics, Hunan Normal University, Changsha, 410081)

Abstract This paper presents a dual input terminal-weak signal amplifier used to measure the critical temperature T_c of superconductor, analyses its character in design, circuit principle and technical measures.

Key words high resolution; measuring errors; A/D conversion; digital display

用电阻法测量超导临界温度 T_c , 是超导研究重要的工作环节。目前国内先进的测量方法, 是用两台高分辨率 ($0.1\mu V$ 左右), 有 488 数字输出接口的数字电压表同时放大反映超导样品电阻和温度的两路电压信号并进行 A/D 转换, 输出的数字信号并行送入微型计算机, 进行数据处理, 实时显示、打印数据和 R-T 曲线。这一测量系统所需仪器多、价格昂贵, 不适合在高校实验教学中使用。

我们研制了一种双端输入差动直流放大器(以下简称放大器), 放大反映超导样品电阻的微弱电压信号。放大器与装有双通道同步 A/D 转换器^[1]插件的微型计算机联机后, 能进行超导临界温度 T_c 的测量。放大器具有高输入阻抗、低噪声、低温漂、良好线性及操作方便, 成本较低的优点。经过一年多的实验, 证明其性能稳定可靠, 达到了原设计的要求。

1 设计思想

超导电阻的测量采用 4 引线电阻测量法, 超导样品的 2 根电流引线与提供测试电流的恒

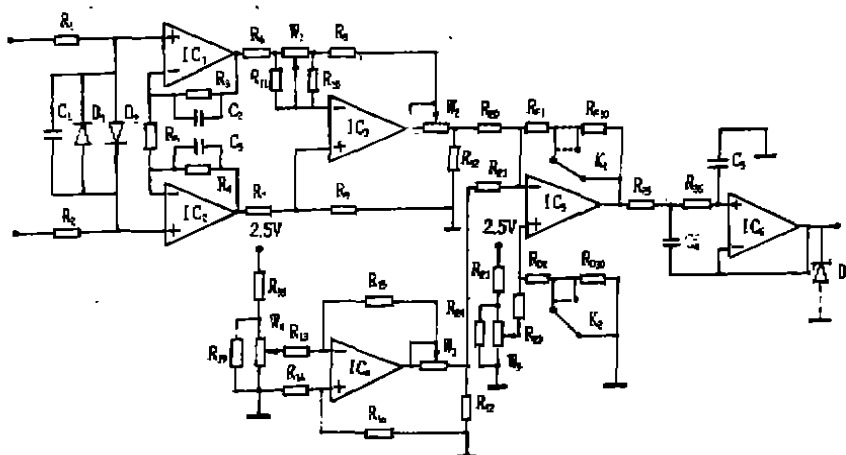
流源相连,2根电压引线为双端输入的放大器提供电压信号.电压的大小由样品电阻、测试电流确定;室温下超导样品呈高阻值,一般在 $10\sim 0.01\Omega$ 之间,选择适当的测试电流(在 $0.1\sim 10\text{mA}$ 范围内),可使放大器输入电压为 $2\sim 0.1\text{mV}$.室温下放大器输出电压应接近4位半数字显示,计算机数据采集A/D转换器满量程(2万码量程)要求的 1.9999V 电压值,放大器的电压增益应设计为 $60\sim 80\text{dB}$ 可调.

测试中,通过样品的电流恒定不变,样品电阻随温度降低而减少.样品进入超导态时,电阻急剧下降变为0.超导测试要依据放大器输出电压随温度的变化绘出超导样品的R-T曲线,确定超导临界温度 T_c .为了保证 T_c 测量的准确性,要求放大器 60dB 电压增益时,因共模干扰、电路的非线性、漂移及噪声引入的测量误差输出端应小于 0.2mV ,为A/D转换2个最小数字位(2LSB)的电压值,折算到放大器输入端的误差应小于 $0.2\mu\text{V}$.

对放大器(电压增益为 60dB)性能指标的主要要求是:在实验室温度下,放大器在 $\text{DC}\sim 10\text{Hz}$ 频带内共模抑制比达 120dB ;在超导样品电压信号变化范围内放大器非线性小于 0.01% ;温度 $0^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ 变化放大器输出电压总漂移小于 0.4mV ,超导测量全过程中输出电压时漂小于 0.01mV ,放大器输出端噪声有效值不超过 $17\mu\text{V}$.

2 电路结构和工作原理

放大器电路如下图所示.运算放大器(以下简称运放) IC_1 、 IC_2 、 IC_3 组成反相并联差动前置级放大电路, IC_4 为前置级温度补偿电路, IC_5 为增益可调的加法器电路, IC_6 为有源低通滤波输出电路.



附图 放大器电路

2.1 前置级放大电路

前置级运放的温漂和噪声指标,是影响放大器质量的关键之一.为使放大器与超导低阻抗信号源实现最佳噪声匹配,前置级采用双极型运放. IC_1 、 IC_2 、 IC_3 选用低温漂、低噪声的AD707型(通用型)运放.该器件工作温度范围 $0^\circ\text{C}\sim 75^\circ\text{C}$,输入失调电压 $5\mu\text{V}$,温漂 $30\text{nV}/^\circ\text{C}$,噪声 $9.6\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1kHz ,增益带宽 900kHz ,非常适于微弱信号直流放大器前置级电路的应用.

前置级为反相并联差动放大电路结构, IC_1 、 IC_2 处于对称位置, 要求两运放性能相同, 且 R_3 、 R_4 相等; 这样, 两运放的共模增益、失调及漂移产生的误差基本抵消, IC_3 双端输入差动放大电路, 要求其同相端与反相端的反馈系数相等、放大系数相等。前置级电压增益和输入电阻的计算公式为^[3,3]

$$A_v = \frac{R_9}{R_8} \left(1 + \frac{R_3 + R_4}{R_5} \right), \quad (1)$$

$$R_{ie} = 2R_i \left(K_o \frac{R_5}{R_3 + R_4 + R_5} + 1 \right). \quad (2)$$

式中 R_i 、 K_o 分别为运放 IC_1 、 IC_2 的输入电阻和开环增益。前置级差模电压增益设计为 60dB, 其中前级 IC_1 、 IC_2 增益分配 60dB, 后级 IC_3 0dB。故有 $R_8/R_9 = 1$, $(R_3 + R_4)/R_5 \approx 1000$ 。双极型运放 R_i 约几 $M\Omega$, 又 $K_o R_5 / (R_3 + R_4 + R_5) \gg 1$, 前置级为高阻抗输入级, 它从超导样品吸取的电流极小, 避免了引线及样品接点电阻给测量带来的影响。

单位增益的 IC_3 差动输入电路的作用是抑制共模信号, 将 IC_1 、 IC_2 双端输出转变为单端输出, 适应接地负载需要。电路的共模抑制比 $CMRR$ 由运放共模抑制比 $CMRR_{(OP)}$ 和 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 失配 (失配公差为 σ) 限定的共模抑制比 $CMRR_{(R)}$ 两部分组成^[3]

$$CMRR = \frac{CMRR_{(OP)} CMRR_{(R)}}{CMRR_{(OP)} + CMRR_{(R)}}, \quad (3)$$

且有 $CMRR_{(R)} = \frac{1}{2\sigma}$ 。

R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 用 $\sigma = 0.1\%$ 的精密电阻, $CMRR_{(R)}$ 仅 54dB。精密电阻 R_{10} 、 R_{11} 和 10 圈精密电位器 W_1 组成的微调电路, 可补偿 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 阻值的偏差, 提高电路对共模信号的抑制能力及增益精度。 R_{10} 、 R_{11} 阻值为 4 电阻的 0.1%, W_1 最大可调范围为 $\pm 0.1\%$ 。测试表明, IC_3 差动输入电路对直流、10Hz 交流共模信号的抑制分别达到了 76dB、66dB。前置级共模抑制比在 120dB 以上。

前置级高增益 IC_1 、 IC_2 放大电路中不设置调零电路, 以避免调零电位器温度特性、机械阻力稳定性等因素对前置级的影响。

D_1 、 D_2 为输入保护二极管, R_1 、 R_2 为限流电阻, 用以防止静电干扰、几百 mV 电压下大电流损坏运放, 使其偏移电压、温漂和噪声等参数受到严重影响。电容器 C_1 对差动输入信号起低通滤波作用, C_2 、 C_3 是消除自激的电容, C_1 、 C_2 、 C_3 选用损耗角正切小的优质电容器 (如聚四氟乙烯电容器), 以减少噪声。

实测表明, 温度 $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 变化前置级输出电压漂移 1.6mV (此数据包括电源电压温漂的影响), 折算到输入端的温漂为 32nV/ $^\circ\text{C}$, 优于一般超高精度仪表放大器集成电路的 0.25 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的指标^[4]。

2.2 温度补偿电路

为进一步减少放大器输出电压的温漂, 我们设计了 IC_4 温度补偿电路。 IC_4 选用噪声较小、温漂大 ($3 \sim 10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) 且极性与前置级温漂相反的运放, 如 $\mu\text{A}741$ 、F007 等。该电路温漂与增益成正比, 电路约 20dB 增益的温漂与前置级相当, 而噪声电压反为前置级的几十分之一。补偿电路最大增益由 R_{13}/R_{15} 确定, 输出电压由电位器 W_3 调节。

电阻 R_{18} 、 R_{19} 和电位器 W_4 组成 IC_4 偏压电路, 调节 W_4 可使补偿电路输出跟踪前置级输出的失调电压, 2.5V 电压由高精度稳压器 MC1403 提供, 该电压的温度系数为 10PPm/ $^\circ\text{C}$, 保证了偏移电压的稳定性。

IC₄ 温度补偿电路调试方便,易实现精确跟踪补偿.测试表明,经温度补偿后,温度 0℃~50℃变化,放大器 60dB 增益时输出电压温漂约 0.3mV,折算到输入端温漂为 6nV/℃.

2.3 增益可调的加法器电路

在 IC₅ 反相加法器电路中, $R_{F1}=\dots=R_{F10}=R_{20}=R_{21}$,前置级、温度补偿电路输出的电压经 R_{20} 、 R_{21} 转换为电流,在“虚地”相加,经反馈电阻 R_{F1} — R_{F10} 转换为输出电压.输出电压为放大的输入电压之和,输入端极性相反的漂移电压互相抵消.通过转换开关 K_1 改变接入的反馈电阻数,使电路增益在 0dB~20dB 范围内分档调节.为保证增益精度, R_{20} 、 R_{21} 及 R_{F1} — R_{F10} 选用 $\alpha=0.1\%$ 的精密电阻.IC₅ 作加法运算的先决条件是同相、反相输入端的电阻相等.为使增益改变不影响两输入端电阻相等,取 $R_{22}=R_{20} // R_{21}$, $R_{01}-R_{D10}$ 与 $R_{F1}-R_{F10}$ 相等, K_2 与 K_1 同步转换.

放大器通过 10 圈电位器 W_5 手动外调零.调零电压加在 IC₅ 同相输入端, R_{23} 、 R_{24} 和 W_5 组成分压电路,2.5V 电压由高精度稳压器 MC1403 提供. R_{23} 、 R_{24} 选用低温度系数、 $\sigma=1\%$ 的精密电阻.IC₅ 输入端有几 mV 失调电压时,不宜对运放内调零.内调零实际上是调偏运放内部电阻,改变其工作状态,每调偏电压 0.1mV 引入附加漂移约 0.3 μ V/℃.IC₅ 选用温漂 0.2 μ V/℃、噪声 9.6nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (1KHz)的 OP07 型运放.

前置级和加法器电路为线性放大电路,用分辨率 0.1 μ V 的 8505 型数字电压表测放大器(60dB 增益)输入、输出电压,输入电压 10.0~1999.9 μ V 变化时,输出电压呈线性变化;计算表明放大器非线性小于 0.01%.放大器时漂小,将两输入端短接并接地,用数字电压表测量输出电压,通电 20min 后,连续 2hr 通电放大器输出电压漂移小于 0.01mV;连续 24hr 通电,总漂移小 0.05mV.

2.4 有源低通滤波输出电路

IC₆ 与电阻 R_{25} 、 R_{26} 和电容 C_4 、 C_5 组成有源低通滤波电路,电路电压增益为 0dB.低通滤波的截止频率为 $1/2nC_0R_0$, R_0 、 C_0 为标准电阻、电容,且有 $R_{25}=R_{26}=R_0$, $C_4=\sqrt{2}C_0$, $C_5=C_0/\sqrt{2}$.低通滤波电路截止频率设计为 10Hz,可满足超导电阻变化速度的要求及提高放大器信噪比.IC₆ 选用 OP07 型运放, R_{25} 、 R_{26} 、用 $\sigma=1\%$ 精密电阻, C_4 、 C_5 用优质电容器.

为防止放大器输出电压幅值超过 A/D 转换器 $\pm 5V$ 的电源电压值,滤波电路输出端加稳压管 D_3 限幅,保护 A/D 转换器不被损坏.

在 DC-10Hz 窄频带下工作的放大器噪声低.将放大器两个输入端短接并接地,用灵敏度达 200 μ V/cm 的 SBR-1 型示波器观测放大器输出端的噪声波形,其最大峰峰值低于 100 μ V,有效值低于 17 μ V.

3 技术措施

通用运放电源电压抑制比 PSSR 有限,为 30~150 μ V/V,电源电压的波动使运放的输出受影响.放大器的电源要求稳定度高,纹波小,采用两个 5G14C 组成正、负稳压电源.能满足要求.针对运放抑制高频共模干扰能力较低这一特点,加强对电源高频滤波.每一级运放用 1 μ F 钽电容滤波.

为提高抗干扰能力,放大器采用双层屏蔽,内层用铜材料作屏蔽罩;连线采用屏蔽线.电源绕装有滤除串模干扰的电源滤波器;电源变压器铁芯、初级线圈,次级线圈内外层电源绕组多

层屏蔽. 数字显示电路由外层电源供电, 直流放大电路由内层电源供电. 放大器印刷板采用四氟乙烯印刷电路板, 加宽地线, 加大接插件地线接触面积, 减少地线电阻. 吸收大电流的电源地与信号地、屏蔽地分开; 模拟地与数字地分开, 采用一点接地.

放大器与计算机联机进行超导测试时, 通过软件设计, 数据处理中进行平均数据滤波, 进一步提高测试系统抗干扰能力.

4 结束语

测试超导时, 须同时放大从电阻温度计上检出反映温度的电压信号. 室温下铂电阻温度计的阻值近 70Ω , 测试电流为 1mA , 检测电压近 70mV . 放大器采用双端输入差动直流放大电路, 电压增益 28dB 即可. 放大器因非线性、漂移、噪声引起的输出误差小于 4 位半数字显示、计算机数据采集 A/D 转换的 $1/4\text{LSB}$ 的电压值. 超导样品、电阻温度计电压放大须同步, 两通道的时间常数相等.

放大器输出电压可直接送入 X-Y 记录仪, 绘出超导样品的 R-T 曲线.

放大器亦可用于其他微弱信号的放大, 若需放大的电压信号为单端输入信号, 只要将放大器 IC_2 的输入端接地即可.

参 考 文 献

- 1 金泽渊, 涂启新. 双通道同步 A/D 转换器. 微计算机应用, 1993. (6), 37
- 2 张郁弘, 庄灿涛. 晶体管运算放大器及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- 3 曾新民, 曾天剑. 运算放大器应用手册. 北京: 电子工业出版社, 1990.
- 4 杨适, 沙建军. 线性集成电路器件及应用手册. 北京: 光明日报出版社, 1988.